

後退平板境界層における横流れ不安定場の解明とその制御

| | |
|-----|---|
| 著者 | 江上 泰広 |
| 号 | 1893 |
| 発行年 | 1996 |
| URL | http://hdl.handle.net/10097/7166 |

| | |
|-------------------|--|
| 氏 名 | え がみ やす ひろ 江 上 泰 広 |
| 授 与 学 位 | 博士（工学） |
| 学 位 授 与 年 月 日 | 平成9年3月25日 |
| 学 位 授 与 の 根 拠 法 規 | 学位規則第4条第1項 |
| 研究科、専攻の名称 | 東北大学大学院工学研究科（博士課程）機械工学第二専攻 |
| 学 位 論 文 題 目 | 後退平板境界層における横流れ不安定場の解明とその制御 |
| 指 導 教 官 | 東北大学教授 小濱 泰昭 |
| 論 文 審 査 委 員 | 主査 東北大学教授 小濱 泰昭 東北大学教授 井上 督 東北大学教授 中橋 和博 東北大学教授 升谷 五郎 東北大学助教授 福西 祐 |

論文内容要旨

第1章 緒 論

次世代旅客機を開発する上で、ペイロードの向上を図ることは重要なデザインコンセプトの一つとなっている。現在の航空機では、遷音速領域での造波抵抗を減少させるために主翼に後退角が導入されている。しかし後退翼表面上の境界層は、圧力勾配の方向と主流の方向が異なるためにねじれた形となり三次元境界層を形成する。その結果三次元化した境界層の乱流遷移は、二次元的な境界層のそれと比べて早まることが知られており、この現象は横流れ不安定性と呼ばれ様々な研究がなされてきている。航空機の更なる抵抗軽減のためには、このような後退翼上の流れを層流制御する必要がある。しかしこの三次元境界層を層流化する技術は非常に難しく、未だ有効なものは考案されていない。有効な制御を実現するためには、翼表面で起こる横流れ不安定性による三次元境界層の乱流遷移のメカニズムを十分に理解しなければならず、そのため多くの研究者がこの問題に実験、数値解析の両面から精力的に取り組んできている。しかしながら現在までのところ、横流れ不安定性を主因とする三次元境界層の乱流遷移メカニズムの全体像を解明するまでには至っていない。

本研究では、上部に圧力印加物体を設置した後退平板モデルを導入し、横流れ不安定性に関する実験を行っている。この実験モデル上に層流から乱流に至る全ての遷移過程を再現し、遷移過程の最終段階を熱線流速計と可視化法を併用して詳細に調べている。そして、得られた流れの遷移機構の情報を基に遷移構造を考慮した選択吸い込みを行い、横流れ不安定場の有効制御を試みている。

第2章 実験方法及び測定方法

横流れ不安定性を主因とする三次元境界層の乱流遷移メカニズムの全体像は、未だ十分には解明されるには至っていない。その理由の一つは、後退翼表面の三次元ねじれ境界層内の乱流遷移、機構が非常に複雑なためである。また一連の不安定性が高速で薄い境界層中に発生することも機構解明を困難にする

一因になっている。

この点を改善するため、Saric & Yeats は後退翼の代わりに上部に圧力印加物体を設置した後退平板モデルを考案し、境界層内の遷移機構を詳細に測定することに成功している。この実験モデルを用いると、測定面が平板であるため壁面の曲率は考慮しなくて済み、後退翼モデルでは薄かった境界層も厚くできる。また同じ流れ条件を保ったまま流速を小さくすることができるなど測定する上で様々な利点を有している。本研究ではこのモデルをさらに改良し、層流から乱流に至る全ての遷移過程を再現し、遷移過程の最終段階を熱線流速計と可視化法を併用して詳細に調べている。そして、得られた流れの遷移機構の情報を基に遷移構造を考慮した選択吸い込みを行い、横流れ不安定場の有効制御を試みている。

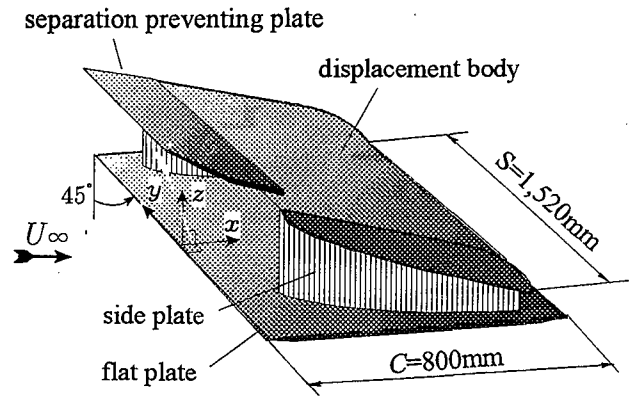


Figure 1. Experimental set-ups and coordinate system.

第3章 横流れ不安定場の可視化

本章では後退平板モデル上に作り出した横流れ不安定場を煙法などの方法を用いて可視化し、その遷移過程を詳細に観察している。

横流れ不安定場の遷移過程ではまず横流れ渦といわれる同方向に回転する縦渦が生じる。また同時に横流れ渦によって誘起された反対方向に回転する二次渦（渦A）が生じる。横流れ速度成分はこの渦Aを乗り越えるようにして流れている。そして横流れ渦の揺動の開始に伴いその一部は巻き上がり部分へと入って行くようになり周期的な巻き上がり運動を始める。この巻き上がり運動の周期は約100Hzであり、伝播方向は横流れ渦に対し直角方向であった。これは熱線流速計で測定された低周波進行波のものとよく一致している。この横流れ渦の揺動は横流れ渦の成長によって生じたスパン方向の境界層速度分布の変曲点に起因する変曲点形不安定性によって生じている。これらの結果より、低周波進行波とは横流れ渦のスパン方向の変曲点形不安定性による横流れ渦の揺動によって生じるものと考えられる。

さらに横流れ渦が成長すると遷移過程の最終段階において高周波二次不安定性が発生する。この高周波二次不安定性は、横流れ渦の巻き上がり部分の高せん断層で発生し、低周波進行波よりも一桁大きい1.2kHzの周波数をもち、横流れ渦に跨るような構造をしている。この高周波二次不安定性が発生すると流れ場は急速に乱れ、乱流へと遷移していく様子が観察された。

第4章 横流れ不安定場の乱流遷移機構

本章では熱線流速計を用いて横流れ不安定場を詳細に測定し、その乱流遷移機構について考察している。その結果、その遷移過程は可視化の結果と同様にまず横流れ渦が発生し、その成長に伴い低周波進行波が現れ、さらにその最終段階において高周波二次不安定性が発生し乱流遷移に至るというものであることがわかった。また低周波進行波、高周波二次不安定性の各攪乱のみをバンドパスフィルターを用いて取り出しその分布を調べた。低周波進行波は横流れ速度成分が二次渦Aを乗り越える部分で大きく成長しており、

可視化からの推論が妥当であることを示している。また遷移過程の最終段階で現れる高周波二次不安定性は横流れ渦によって低速流が巻き上げられ高速流との間で高せん断層を形成する巻き上がり部分で大きく成長している。また成長率を調べたところ、高周波二次不安定性は N -factor の値で $N=9$ と横流れ渦、低周波進行波の成長率と比較して顕著に大きな値を示した。これらのことより横流れ不安定場を乱流遷移に導く直接の原因となるのは高周波二次不安定性であることがわかる。

第5章 選択吸い込みによる横流れ不安定場の制御

本章では第3章、第4章で得られた横流れ不安定場の乱流遷移機構の情報を踏まえて、選択的吸い込みによる流れ場の層流制御を試みている。

横流れ不安定場を直接乱流へと導いている高周波二次不安定性の発生を抑制するためには、その発生源である横流れ渦の巻き上がり部分に形成される高せん断層の発達を抑制すれば良い。そのためには渦運動によって巻き上げられる低速流部分を選択的に吸い込めば良いという見通しが得られる。このようなアイディアのもと装置を設計・製作し、選択的吸い込みにより層流制御を試みた。その結果、従来の一様吸い込みと比較して約半分の吸い込みエネルギーにより同等以上の制御効果が得られることを見出している。また選択吸い込みを行う際はその制御位置が重要であることも見出した。すなわちスパン方向位置では、横流れ速度成分が渦Aを乗り越え巻き上がり部分に入ってゆく前にあらかじめ吸い取るべく、渦Aから巻き上がりにかけての位置で吸い込むのが良く、またコード方向位置では高周波二次不安定性が発生する前の線形成長段階で制御を行うと効果的である事が分かった。また吸い込み量及び、吸い込み速度には適切な値があり、過剰な吸い込みは逆に流れ場を不安定にすることが分かった。これらのことを考慮した選択吸い込みを行うことにより約60%遷移を遅延させることに成功した。

第6章 表面粗さに対する横流れ渦の応答

選択吸い込みによる制御を行う際にはその制御位置が重要である。そのため横流れ渦を任意の位置に発生させる必要がある。その方法の一つとして前縁付近に微小粗さを設置する方法が挙げられる。本章では前縁付近に設置した微小粗さが横流れ不安定性に及ぼす影響について述べている。その結果、微小粗さが作り出す攪乱と共に、流れ場の境界条件等が横流れ渦の発生位置に対し大きな影響を及ぼしていることが明らかになった。

第7章 結論

本論では次世代旅客機を開発する上で重要である主翼に用いられている後退翼上に発達する横流れ不安定場の層流制御技術を開発するための基礎的研究として、後退平板モデルを用いた実験的研究を行った。そして横流れ不安定場を可視化法及び熱線流速計を用いて詳細に調査することにより、流れ場を乱流遷移へと導く直接的原因となるのは高周波二次不安定性であることを明らかにしている。また得られた遷移機構の情報を考慮した選択吸い込みによる層流制御法を提案し、従来の一様吸い込みによる制御と比較して約半分のエネルギーで同等以上の制御効果を得た。

審 査 結 果 の 要 旨

現在就航している大型旅客機は造波抵抗軽減の目的で主翼に後退角を持たせているが、その結果境界層が三次元化し横流れ不安定性が生じてしまい、早期に乱流遷移して摩擦抵抗を増大させてしまっている。次世代旅客機開発のためには翼上の境界層を層流制御する必要があるが、本論文はそのための基礎データを提供している。すなわち、後退翼境界層を模擬でき、実験し易い後退平板モデルを設計・製作し、乱流遷移メカニズムを詳細に測定、得られた結果から有効な制御法として選択的吹込みを考案し、従来方法よりも高い効率で流れ場を制御することに成功しており、全7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、実験方法および基本的な横流れ不安定場について述べている。

第3章では、横流れ不安定場を煙法などの方法を用いて可視化し、乱流遷移過程を詳細に観察している。その結果、横流れ渦の発達過程、および低周波進行波、高周波進行波（二次不安定性）を捉える事に成功し、その発生機構を明らかにしている。

第4章では、横流れ不安定場の遷移過程を熱線流速計を用いて詳細に測定している。その結果、横流れ不安定場は、層流から横流れ渦の発生、低周波進行波の発生、高周波二次不安定性の発生という過程を経て乱流遷移する、という遷移プロセスを辿る事が確認された。また流れ場を乱流遷移に導いているのは横流れ渦の巻き上がり部分に形成される高せん断層で生じる高周波二次不安定性である事を明らかにした。これは有用な知見である。

第5章では、得られた結果を基に選択的吸込み法を考案し有効な層流制御法を開発している。すなわち、直接乱流遷移に寄与しているのは高周波二次不安定性であるので、その制御のために横流れ渦運動により巻き上げられる低速流部分を選択的に吸込むことにより制御を試みた結果、従来の一様吸込みと比較して約半分の吸込みエネルギーにより同等以上の制御効果を得ている。これは応用上重要な知見である。

第6章では、前縁付近に微小粗さを設置した場合の横流れ不安定性に及ぼす影響について調べている。その結果、微小粗さが作り出す攪乱と共に、流れ場の境界条件等が横流れ渦の発生位置に対し大きな影響を及ぼしていることを明らかにしている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、横流れ不安定場の乱流遷移機構を明らかにし、その情報を基に選択吸込みを考案し流れ場の層流制御を試みたものであり、次世代航空機開発上有益な基礎情報を与えたものであり、機械工学、航空工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。